

電気光学効果を用いた電磁界センサの歴史と今後の課題

桑原 伸夫^{†a)}

History of Electric Field Sensor Using Electro-Optic Effect and Future Subject

Nobuo KUWABARA^{†a)}

あらまし LiNbO₃ 等の電気光学効果を利用した電磁界センサは電源を必要とせず、ほとんどの部品を非金属で構成できるので、理想的な電磁界センサを実現できる。そのため、1970年代から研究開発が進められてきた。バルク結晶を用いた電界センサは、100mm程度の長さのセンサエレメントを使用した場合、実用感度は1V/m程度である。また、電極を使用しない場合、180GHzまでの電界検出が可能で、大きさも200 μ m程度まで小さくできる。感度を改善するためには、光導波路を用いた光変調器を使用することが有効で、周期的に変化する電界の場合、1mV/m程度の強度は十分に検出可能である。また、センサエレメントを、光導波路を作製した基板上に形成することにより10GHz以上の高い周波数まで測定可能な電界センサが実現されている。ループアンテナに光変調器を取り付けた磁界センサは近傍磁界の測定に有効で、1辺が0.3mmのループを使用して60GHzまで応答するものが報告されている。電気光学効果を利用した電磁界センサは無誘導、小型、広帯域の特性を有しているので、レーダ波の検出、近傍電磁界の測定、アンテナ特性の測定、SAR測定、EMC試験設備の評価等に向けた応用研究が進められている。電磁界センサの今後の主な課題は再現性を含む安定性の向上とダイナミックレンジの改善である。これらは、技術の進歩により解決され、光電磁界センサが重要な部品としてシステムの中に組み込まれて使用されるようになるかと信じている。

キーワード 電界センサ, 磁界センサ, 電気光学効果, 磁気光学効果, 光変調器

1. まえがき

ポッケルス効果等の電気光学効果を電磁界計測に応用する発想は、これらの効果が発見された、19世紀より研究者の中で考えられてきた。しかしながら、本格的に電気光学効果を利用した電磁界センサの研究が開始されたのは、光ファイバ通信技術の進歩により、半導体レーザ、ホトダイオード、光ファイバと言った電磁界センサを構成する基本的なデバイスの性能が向上した1970年代に入ってからである[1], [2].

電磁界センサで使用する、光ファイバや電気光学結晶は誘電体のため比誘電率が金属に比べて非常に小さいので電磁界に与える影響が少ない電磁界センサを実現できる。また、電池等の電源をセンサ部で使用する必要がないため、長時間動作が可能で小形の電磁界セ

ンサを実現できる特徴も持っている。特に、光導波路型光変調器の開発により、電磁界センサの感度が向上し、実用化レベルの応用も検討されてきている。

本論文では、光変調器を利用した、電磁界センサの原理、研究の歴史と今後の課題について述べる。

2. 電気光学効果結晶を使用した電磁界センサの原理

電気光学結晶に電界を印加するとポッケルス効果により屈折率が変化する。例えば、代表的な電気光学効果をもつ結晶であるニオブ酸リチウム(LiNbO₃)では、電界強度と屈折率の変化は次の式で与えられる[3], [4].

$$\Delta n = -\frac{n^3 \eta}{2} E_i \quad (1)$$

ここで、 n は屈折率でLiNbO₃の場合、波長1.3 μ mで2.22(常光)、 η はポッケルス定数で 30×10^{-12} m/V、 E_i は電界強度である。この屈折率変化のため長さ l の結晶を通過する光波は位相が変化し、位相変化と結晶の長さの関係は式(2)となる。

[†]九州工業大学大学院工学研究院電気電子工学研究系、北九州市
Department of Electrical Engineering and Electronics,
Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu-shi, 804-8550
Japan

a) E-mail: kuwabara.nobuo@buddy.elcs.kyutech.ac.jp

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta n l}{\lambda_0} \quad (2)$$

ここで λ_0 は光波の波長である。式 (1), (2) を使用すると位相を半波長 (π) 回転させるためには、波長 $1.3\mu\text{m}$ で、電界を印加する長さ (結晶の長さ) が 10mm の場合、 $4 \times 10^5 \text{V/m}$ の電界強度を必要とする。これは、空間の電界強度としては、非常に強い値である。そのため、初期の段階では、高電圧変圧器近傍等の高電界の検出に応用された [5]。この種のセンサは、感度の問題はあがるが、電極を使用していないので、材料のみの特性で周波数応答が決定し、現在、高い周波数での応用に関する研究が進められている [6]。

空間に $4 \times 10^5 \text{V/m}$ の電界を発生させるためには大きな設備を必要とするが、平行平板を利用して狭い空隙を作成し、平板間に電圧をかければ、この程度の電界は比較的簡単に作成できる。例えば、電極を平行平板と仮定すれば、発生する電界は、近似的には、式 (3) となる。

$$E_i = \frac{V}{d} \quad (3)$$

d は電極間の距離、 V は電極間の電圧である。電極間距離と波長 $1.3\mu\text{m}$ において位相を半波長 (π) 回転させる $4 \times 10^5 \text{V/m}$ の電界を発生させるために必要な電極間電圧 (半波長電圧 (Half wavelength voltage)) の関係を図 1 に示す。図に示すように、電極間距離 1mm 、電極長さ 10mm の場合、 400V 程度の電圧で位相を半波長 (π) 回転させることが可能である。また、光導波路を用いた場合は電極間隔が更に小さくなるので数 V にすることが可能である。

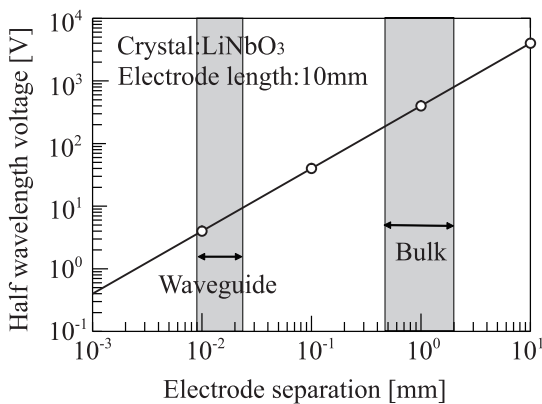


図 1 電極間距離と半波長電圧の関係

Fig. 1 Relation between half wavelength voltage and distance of electrode.

このように、電極間隔を小さくすることにより、実際の空間に発生している電磁界の測定が可能なセンサが実現できる。以下、電磁界センサの構造と特性について述べる。

3. 電磁界センサの構造

3.1 バルク結晶を使用した電界センサの構造

電界センサとして、初期に開発されたのは、製造が簡単な点から、バルク結晶 (Bulk crystal) を用いた電界センサである。このタイプの電界センサの構造例 [3] を図 2 に示す。光ファイバを用いて光源から届いた光波は最初のレンズにより、電気光学効果をもつバルク結晶で構成される光変調器を通過するように平行光に変換される。変換された光波は偏光子 (Polarizer) により結晶に対して 45° の成分を切り出されて結晶に入射される。センサエレメントが電界中にあると電極 (Electrode) に電圧が誘導される。そのときに、光波の電界が電極に平行である成分と直交する成分の伝搬速度差が電気光学効果によって変化するので、直線偏波がだ円偏波になる。だ円偏波になった光波は温度補正用の結晶を通過した後、偏波補償器 (Babinet-soleil compensator) で直線性の良い位置 (電界が印加されない状態で円偏波となる位置) に調整され、偏光子と 90° 傾いた位置に配置された検光 (Analyzer) 子により、印加された電界に相当する変化分を振幅の変化として検出する。検光子を出た光波はレンズにより光ファイバに集光され、遠方に置かれた光検出器により電界強度に相当したレベルが検出される。

電極に印加された電圧と検光子の出力 P_{out} との関係は次の式で与えられる [3]。

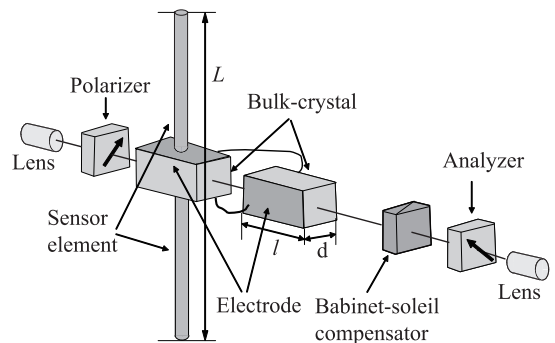


図 2 バルク結晶を用いた電界センサの構造

Fig. 2 Configuration of electric field sensor using bulk crystal.

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{2} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{V}{V_{\pi}} + \delta_0 \right) \right\} \quad (4)$$

ここで、 P_{in} は入射光電力、 V_{π} は位相を半波長 (π) 変化させるために必要な電圧で、半波長電圧と呼ばれる。 δ_0 は位相補償器による位相変化で、通常は式 (4) において、電圧を印加しない状態で最も直線性が良い位置 ($\delta_0 = \pi/2$) に設定する。

電界センサの等価回路を図 3 に示す。図において、 E_i はエレメントに印加される電界、 L_{eff} はエレメントの実効長、 Z_a はエレメントの入力インピーダンス、 Z_m は電極の負荷インピーダンスである。エレメント長が波長に比べて十分短く、電気光学結晶の誘電損失や接続用ワイヤのインダクタンスが無視できる場合、等価回路は図 3 (b) のようになる。図 3 (b) の回路は、電界センサが直流から動作することを示している。

バルク結晶を利用した電界センサの研究は NBS (National Bureau of Standards) (現 NIST (National Institute of Standards and Technology)) で行われ、Wyss らより 1985 年に報告された電界センサは、長さ 10mm、断面 1mm × 1mm の LiTaO₃ の結晶を使用し、波長 0.633 μ m の光波を用いて、1kHz バンド幅において 1V/m の電界を検出した [7]。その後も、電界センサの研究は NBS (現 NIST) で続けられ、数多くの研究成果が報告されている [8], [9]。

1980 年代に偏波面保持ファイバ (Polarization maintain fiber) が開発され、直線偏光を保ったまま光波の伝送が可能となった。そのため、波長を、偏波面保持ファイバの設計波長である、1.3 μ m に変更した電界センサが開発された [1], [3]。この電界センサは、安定性を増すために、LiNbO₃ 結晶をガラスで被う構造を採用し、0 度～40 度の温度変化に対する挿入損失変動が 1dB 以内という優れた安定性を示した [3]。また、図 3 の等価回路や式 (4) を使用し、モーメント法によりエレメント実効長を解析することにより、1dB 程度の精

度で感度解析が可能であることが報告されている [11]。

電界センサの周波数応答特性は、センサエレメントがインダクティブ特性を示す周波数帯域になると変化する。そこで、エレメントに抵抗を装荷することによりインダクティブ特性を抑え感度変化が ± 3 dB の周波数帯域を倍にできること [12]。逆にインダクタンスをエレメントに装荷することにより、感度特性の良い周波数を制御できること [13] が報告されている。

バルク結晶を用いた電界センサは、感度が低い問題点はあるが、安定性に優れているので、イミュニティ試験場所の電界均一性の評価 [14]、静電気放電時に発生する電磁パルスの測定 [15]、マイクロストリップ線路内の電界測定 [16] 等への応用が報告されている。特に、文献 [16] で報告されている電界センサはサイズが約 215 μ m で高い空間分解能が得られている。

3.2 Mach-Zehnder 光変調器を使用した電界センサ

電界センサの感度特性を改善するためには、式 (4) に示すように、光波の電力を大きくするか、半波長電圧を小さくする必要がある。光波の電力については、LD-YAG レーザを使用することにより、LD に比べて、ファイバ内の光波電力を 70 倍 (70mW) にする試みが行われた [3]。しかし、受光に使用するホトダイオードや光ファイバの入力許容電力からこの程度が限界である。

一方、1990 年頃より、高速光通信への適用を目的に Mach-Zehnder 型光変調器の安定性が急速に進歩し電界センサに応用された。Mach-Zehnder 型光変調器を使用した電界センサの構造例を図 4 に示す。図 4 (a) に示すように、偏波面保持ファイバを伝搬して来た直線偏光の光波は光変調器 (Optical modulator) に入射され二つの導波路 (Optical waveguide) に Y 分岐される。図 4 (b) に光変調器の構造を示す。光導波路は LiNbO₃ 等の電気光学効果をもつ結晶上に作製されており、センサエレメント (Sensor element) が電界中に置かれると電極 (Electrode) 間に電圧が誘導され、図 4 (b) に示すような電界が発生する。そのとき、図に示すように、片方の導波路には電極から結晶方向にもう一方には逆方向に電界が印加され、電気光学効果により屈折率が変化するので二つの導波路を伝搬する光波に位相差が生じる。図 4 (a) に示すように、二つの光波を再び合成することにより、位相差を振幅の変化に変換することができる。出力された光波はシングルモードファイバを用いて光検出器に運ばれ、電界強

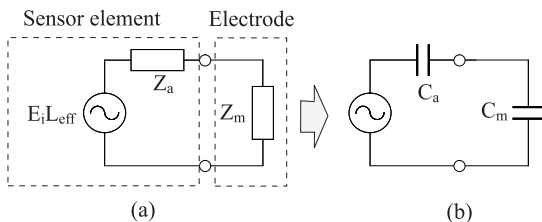
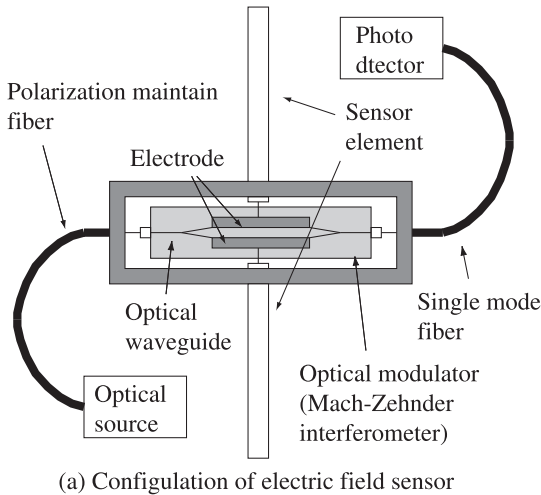
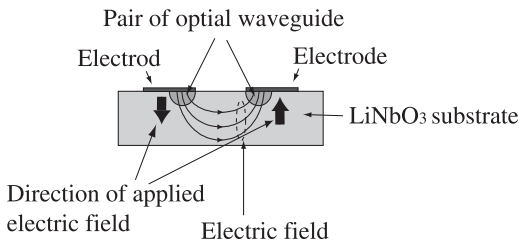


図 3 電界センサの等価回路
Fig. 3 Equivalent circuit of electric field sensor.



(a) Configuration of electric field sensor



(b) Configuration of optical modulator

図 4 Mach-Zehnder 型光変調器を使用した電界センサの基本構造

Fig. 4 Basic configuration of electric field sensor using Mach-Zehnder interferometer.

度に応じたレベルが出力される。

ここで、印加電界と光波の電力の関係は式 (5) となる [3].

$$P_{out} = P_{in} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2}{2} + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \right) \right\} \quad (5)$$

式 (5) において、 \cos 中の第 1 項目は印加電界によって生じる位相遅れで、式 (1), (2) で表される。第 2 項目は導波路の構造により生じる位相遅れである。第 2 項目を $\pi/2$ にすることにより、直線性を示す電界レベル範囲を大きく取れる。

Mach-Zehnder 型光変調器の場合、図 4 に示すように、二つの導波路に逆方向の電界を加えることもできるので、その場合、電極の見かけ上の長さを 2 倍にすることができ感度特性を改善できる。

日本国内では、NTT 通信網総合研究所において、

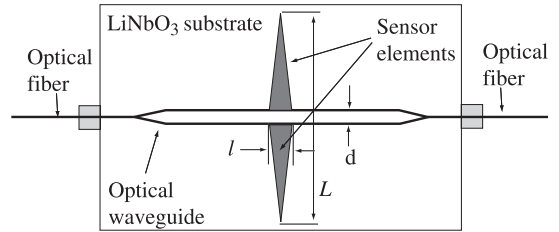


図 5 センサエレメントを電気光学結晶の基板上に配置した電界センサの基本構造

Fig. 5 Basic configuration of electric field sensor placing sensor elements at same substrate.

Mach-Zehnder 型光変調器を使用した電界センサの研究が行われた [17], [18]. この電界センサは、光源と光変調器の接続に偏波面保持ファイバ、光変調器と光検出器の間の接続にシングルモードファイバを使用し、半波長電圧 4V の光変調器と、光ファイバ内電力 25mW の LD-YAG を使用することにより 1mV/m の電界を測定することができた。

Mach-Zehnder 型光変調器の問題点の一つは光バイアス角のコントロールが光変調器の製造段階では難しいことであった。そのため、通常の変調器では、DC バイアスを印加してバイアス点を調整していたが、電界センサの場合、金属部品となるバイアス印加用のバッテリーと回路の使用を避けるため、導波路を曲げることにより、2 本の導波路の長さを変化させバイアス角を調整する方法が考案された [19]. 当初は応力を印加することによる経年劣化が心配されたが、製造後 10 年以上経過しているが、応力の印加による破損は生じていない。

Mach-Zehnder 型光変調器の場合、ピエゾ共振により HF 帯で感度特性の急しゅんな変化が発生する。これは、光変調器基板を長手方向に変化させることにより、抑えることができることが報告されている [20].

Mach-Zehnder 型光変調器を使用した電界センサの安定性は年々改善されてきており、地中レーダのレーダ波の受信 [21], イミュニティ試験設備の評価 [22] 等に使用されている。

Mach-Zehnder 型光変調器は電気光学効果をもつ結晶板上に作製するので、図 5 に示すように、その上にセンサエレメントを直接蒸着させれば、高い周波数まで応答可能な電界センサが実現できる。図で L はエレメント長、 l は電極長、 d は光導波路の間隔である。

例えば、エレメント長 (L) が 9.5mm、電極長 (l) が 2mm、導波路の間隔 (d) が $15\mu\text{m}$ の電界センサ

は4GHz程度まで一定の感度を示した[23]。また、文献[24]では、エレメント長8mmの3軸の電界センサで、10GHz程度まで一定の感度が得られることが報告されている。

Mach-Zehnder型光変調器を利用した電界センサの研究は、仙台に拠点を置いた環境電磁技術研究所、仙台EMCリサーチセンターで行われ、光ファイバを1本にした電界センサ[25]、バルク結晶を用いた電界分布測定法[26]等の多くの成果が報告されている。また、他の研究機関でも研究が行われ、LiNbO₃基板上にログペリオディックアンテナのパターンを形成したセンサ[27]等が報告されている。

小形の電界センサは空間分解能が良いので、アンテナ近傍の放射パターンの測定[28]、SARの測定[29]、近傍電界分布の測定[30]等に利用されている。

3.3 磁界センサ

電気光学効果を用いた磁界センサの構造例[31]を図6に示す。磁界センサの場合、磁気光学効果を利用した磁界センサも当然考えられるが、電気光学効果を用いた結晶の方が品質の良い結晶が入手しやすいため、図6に示すように、電気光学効果を用いた磁界センサが検討された。

電界センサと磁界センサの違いはエレメントの形状のみでそれ以外には大きな違いはない。電気光学効果をもつ結晶を使用した場合、エレメントの負荷インピーダンスは容量性になるので、感度は周波数に比例する。したがって、パルス性の電磁界を測定するには適していないが、小形にできることから、プリント基板上の磁界強度分布等の近傍磁界の測定を目的に研究された。また、FDTD法を用いた解析も行われ、 $L=0.3\text{mm}$ のループを使用することにより60GHzまで解析値と特性が良く一致する磁界センサが報告され

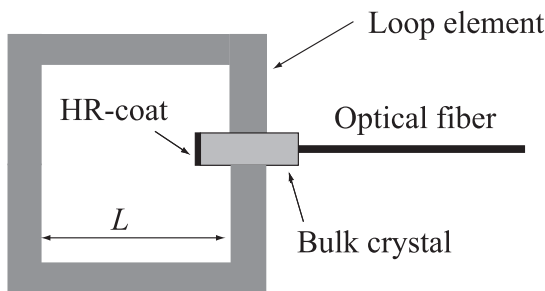


図6 電気光学結晶を使用した磁界センサの基本構造
Fig.6 Basic configuration of magnetic field sensor using electro-optic crystal.

ている[31]。

図6に示すセンサでは、HR-coat (High reflection coat)を使用することにより、1本のファイバで信号の送受を行っており、近傍磁界を測定する際にプローブを当てやすい構造になっている。また、Mach-Zehnder型光変調器を使用した磁界センサも報告されている[32]。

更に、位相の違いにより電界成分を除去する磁界センサ[33]や、電気磁気光学効果をもつフィルムを使用して近傍磁界分布を測定した結果が報告されている[34]。

4. 電磁界センサの現状と課題

“Optical, Electric Field, Sensor”のキーワードで検索を行った結果得られた論文数の年別推移を図7に示す。古い時代は、データベースに掲載されない論文が多いことを考慮しても、光ファイバ技術が進歩した1980年より急速に論文件数が増加しており、この時期より活発に研究が行われていることがわかる。

光変調器を使用した電界センサは、周波数特性が平坦であるので、パルス性の電磁界測定に適している。しかし、ダイナミックレンジを広くできない問題が解決されておらず、最初の電界センサが報告されて30年が経過しているが、まだ、実用レベルで静電気放電等の単発のパルス測定可能な電界センサは実現できていない。

その反面、周期的に変動する電磁界に対しては、周囲の電磁界への影響が非常に小さい特性を生かして、レーダ波の検出[21]、SAR測定[2]、[35]、近傍電磁界測定[16]、[36]、[37]、アンテナの評価[27]、[38]、EMC試験設備の評価[14]、[39]、[40]等少しずつではあるが応用に向けた検討が進んでいる。

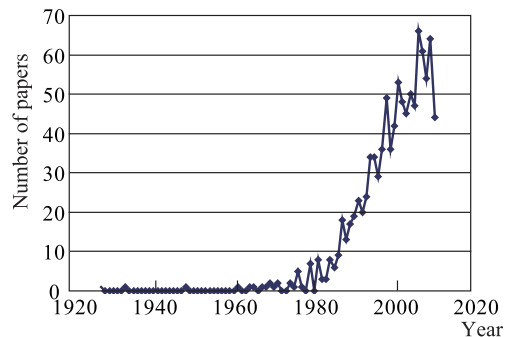


図7 光電界センサの発表論文数の推移
Fig.7 Number of papers concerning to optical electric field sensor.

このように多くの応用が検討されているが、まだ研究ベースでの検討であり、事業所等で特別な知識を必要とせずに利用するためには、価格以外にも、安定性を含む再現性やダイナミックレンジを改善する必要がある。

光電界センサは広帯域特性故に、静電気や商用電源により発生する電界の影響を強く受ける。この点については、現在、電極部分に導電被膜を挿入することにより、ある程度静電気に対する対策はできるようになっている。一方、光源と光電界センサを結ぶ光ファイバについても安定性の問題がある。光ファイバは曲げたときに損失の変動が発生しやすい。光ケーブルのような堅いケーブルを使用すればこの問題はある程度解決するが、利便性が失われてしまう。また、光コネクタの接続再現性についても同軸コネクタに比べれば悪い [41]。最近、曲げに強いケーブルの開発が報告されており [42]、このような最新の技術を取り込むことにより、同軸ケーブル並にラフに使用できる光センサシステムの実現が期待される。また、光源の出力光をモニタすることにより、安定性・再現性を改善する試みが行われている [43]。

電磁界センサのダイナミックレンジが広く取れない理由は、O/E変換器に使用しているホトダイオードに強い光波が入射することにより直流電流が増えショットノイズが発生するのが主な原因である。式 (4), (5) に示すように、光電界センサのもっとも直線性の良いバイアス条件の場合、光変調器に入射する光波の半分のレベルが出力される。これは光電界センサの避けることができない問題である。

ショットノイズは広帯域のランダムノイズであるので、CW信号の検出に関しては、受信機の帯域幅を狭くすればダイナミックレンジを改善することができる。また、繰り返し波形についても、アベレーシングを行えば改善することができる。しかし、静電気放電パルスのような単発パルスの場合、アベレーシングを利用できないので、ダイナミックレンジが小さくなる。強い光波まで検出可能であればダイナミックレンジを改善できるが、PINホトダイオードの場合、光波の最大入力電力は数mW程度である。最近、PINホトダイオードより高い電力まで飽和現象を起こしにくい単一走行キャリアダイオードが開発されており [44]、これと光ファイバ増幅器を組み合わせることにより、ダイナミックレンジを改善できる可能性がある。

このように、光技術の新しい技術を取り入れること

によりこの問題を解決して、単発パルスが測定可能な実用的な電界センサの実現が期待される。

5. む す び

電気光学効果を使用した電磁界センサの歴史と課題について述べた。電磁界センサの研究は現在も続けられており、光ファイバ通信技術の進歩とともに進歩している新しい光部品を利用することにより、安定性・再現性やダイナミックレンジに関する問題が解決され、近い将来に、重要な部品として、電磁界センサがシステム中で使用される日が来ることを信じている。

文 献

- [1] M. Tokuda and N. Kuwabara, "Recent progress in fiber optic antennas for EMC measurement," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E75-B, no.3, pp.107-104, March 1992.
- [2] A. Sugura, N. Kuwabara, and T. Iwasaki, "Current topics of microwave EMI antennas and measurements," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E80-B, no.5, pp.653-662, May 1997.
- [3] 徳田正満, 電磁界計測への光応用, ミマツデータシステム, 東京, 1995.
- [4] 電気学会光波センシング用光源調査専門委員会 (編), 光波センシングとレーザ, コロナ社, 東京, 1997.
- [5] 井原 将, 三井 勉, 多田こう二, 瀧本英之, 辻井浩一, 工原美樹, 龍見雅美, 村上泰典, 川上明彦, "BSO 磁界センサ・電圧センサの開発," *住友電気*, vol.122, pp.33-41, 1983.
- [6] 都甲浩芳, 久々津直哉, "光電界センサの 20kHz から 180GHz までの周波数応答特性," 2012 信学総大, B-4-62, March 2012.
- [7] J.C. Wyss and S.T. Sheeran, "A practical optical modulator and link for antennas," *J. Lightwave Tech.*, vol.LT-3, no.2, pp.316-321, 1985.
- [8] M. Kanda, "Photonic probes for the measuring of electromagnetic field over broad bandwidth," *IEEE National Symposium on EMC*, pp.1-6, Denver, 1989.
- [9] M. Kanda and K. Masterson, "Optically sensed EM-field probes for pulsed fields," *Proc. IEEE*, vol.80, no.1, pp.209-215, June 1992.
- [10] 桑原伸夫, 倉本昇一, 佐藤正治, 徳田正満, "光学結晶を用いた電界アンテナの特性," *信学技報*, EMCJ88-90, March 1989.
- [11] 小林隆一, 田島公博, 桑原伸夫, 徳田正満, "LiNbO₃ 光変調器を用いた電界センサの感度解析," *信学論 (B-II)*, vol.J79-B-II, no.11, pp.734-743, Nov. 1996.
- [12] 田島公博, 小林隆一, 桑原伸夫, 徳田正満, "光変調器を用いた電界センサの抵抗抗荷エレメントによる周波数帯域改善法," *電学論 (A)*, vol.117, no.5, pp.515-521, May 1997.
- [13] 田島公博, 桑原伸夫, 雨宮不二雄, 小林隆一, "LiNbO₃ を用いた電界センサのインダクタンス装荷による感度向

- 上法,” 信学論 (B-II), vol.J76-B-II, no.9, pp.765–772, Sept. 1993.
- [14] 秋山佳春, 桑原伸夫, 井手口健, “放射イミュニティ試験における地上高 80 cm 以下の印加電界分布の規定方法,” 信学論 (B-II), vol.J77-B-II, no.6, pp.334–342, June 1994.
- [15] 馬杉正男, 桑原伸夫, 徳田正満, 小林隆一, “静電気放電に伴う電磁パルスの光変調器型電界センサによる測定,” 信学論 (B-II), vol.J76-B-II, no.6, pp.530–537, June 1993.
- [16] 福田浩司, 桑原和也, 岩波瑞樹, 増田幸一郎, 越地耕二, “光ファイバー端電気光学プローブによるマイクロストリップライン内の電界測定,” 2008 信学ソ大 (通信), B-4-54, Sept. 2008.
- [17] 桑原伸夫, 田島公博, 雨宮不二雄, “LiNbO₃ 光変調器を用いた高感度電界センサの感度特性,” 信学技報, no.EMCJ 91-6, April 1991.
- [18] N. Kuwabara, K. Tajima, R. Kobayashi, and F. Amemiya, “Development and analysis of electric field sensor using LiNbO₃ optical modulator,” IEEE Trans. Electromag. Compat., vol.34, no.4, pp.391–396, Nov. 1992.
- [19] 小林隆一, 田島公博, 桑原伸夫, 徳田正満, “Mach-Zehnder 型光変調器を用いた電界センサのオプティカルバイアス角調整法,” 信学論 (B-II), vol.J81-B-II, no.5, pp.542–549, May 1996.
- [20] 小林隆一, 田島公博, 桑原伸夫, 徳田正満, “Mach-Zehnder 型光変調器を用いた電界センサの周波数特性改善方法,” 信学論 (B-II), vol.J81-B-II, no.7, pp.699–706, July 1996.
- [21] 佐藤源之, “光電界センサを利用したイメージングレーダ,” 信学技報, PEM 2012-06, Jan. 2013.
- [22] S. Ishigami, K. Harima, and Y. Yamanaka, “TEM-mode E-field uniformity in a GTEM cell,” IEICE Trans. Electron., vol.E84-B, no.9, pp.2610–2617, Sept. 2001.
- [23] 田島公博, 桑原伸夫, 小林隆一, 徳田正満, “マッフアチェンダ型光変調器を用いた微小エレメント電界センサの特性評価,” 信学論 (B-II), vol.J79-B-II, no.11, pp.744–753, Nov. 1996.
- [24] K. Tajima, R. Kobayashi, N. Kuwabara, and M. Tokuda, “Development of optical isotropic E-field sensor operating more than 10 GHz using mach-zehnder interferometers,” IEICE Trans. Electron., vol.E85-C, no.4, pp.961–968, April 2002.
- [25] L. Xiaohu, H. Ota, S. Arakawa, K. Arai, and R. Sato, “Measurement of electric field distribution by optical electric field probe,” IEEE International Symposium on EMC, 1C5-1, pp.157–160, Sendai, 2004.
- [26] M. Takahashi, E. Suzuki, H. Ota, K. Arai, and R. Sato, “High speed system for measuring electromagnetic field distribution,” IEICE Trans. Electron., vol.E89-B, no.10, pp.2905–2912, Oct. 2006.
- [27] 大林亮佑, 菅間秀晃, 土屋明久, 日高直美, 石田武志, 橋本修, “LPDA 型光電界センサによる空間電磁界分布測定,” 2006 信学ソ大 (通信), B-4-4, Sept. 2006.
- [28] M. Hirose, T. Ishizone, and K. Komiyama, “Antenna pattern measurement using photonic sensor for planar near-field measurement at X band,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-B, no.3, pp.727–734, March 2004.
- [29] Y. Kawamura, T. Hikage, and T. Nojima, “Experimental quasi-microwave whole-body averaged SAR estimation method using cylindrical-external field scanning,” IEICE Trans. Electron., vol.E93-B, no.7, pp.1826–1833, July 2010.
- [30] S. Horiuchi, K. Yamada, S. Tanaka, Y. Yamada, and N. Michishita, “Comparisons of simulated and measured electric field distribution in cabin of a simplified scale care model,” IEICE Trans. Electron., vol.E90-B, no.9, pp.2408–2415, Sept. 2007.
- [31] T. Ikenaga, H. Ohba, H. Ota, K. Arai, “Simulated characteristics of optical magnetic field probe,” 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 21R1-1, Kyoto, pp.41–44, July 2009.
- [32] M. Takahashi, H. Ota, K. Arai, and R. Sato, “Magnetic near-field distribution measurement above a patch antenna by using an optical waveguide probe,” IEICE Trans. Electron., vol.E88-B, no.8, pp.3140–3145, Aug. 2005.
- [33] E. Suzuki, S. Arakawa, H. Ota, K. Arai, and R. Sato, “Double-loaded EO magnetic field probe working above 10 GHz,” 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 21R1-2, Sendai, pp.153–156, June 2009.
- [34] M. Takahashi, K. Kawasaki, H. Ohba, T. Ikenaga, H. Ota, T. Orikasa, K. Ishiyama, N. Adachi, and K. Arai, “Optically scanning probe system for electromagnetic near field measurements,” 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 21R1-2, Kyoto, pp.45–48, July 2009.
- [35] 大西輝夫, “光技術を用いた電磁界ばく露評価,” 信学技報, PEM 2012-03, Aug. 2012.
- [36] 土屋昌弘, 塩沢隆広, “電界カメラによるメタマテリアル伝搬波動の映像観察と特性解析,” 2012 信学ソ大 (通信), BI-2-7, March 2012.
- [37] 岩波瑞樹, 中田正文, 塚越常雄, 津田弘樹, 大橋啓之, 明渡純, 原田高志, “光ファイバ型電気光学/磁気光学プローブによる高周波電界/磁界計測,” 2007 信学ソ大 (通信), BS-3-3, Sept. 2007.
- [38] 廣瀬雅信, 黒川 悟, 小見山耕司, 石曾根孝之, “光電界センサと球面走査近傍界測定法による 2GHz 以下のアンテナパターン測定,” 2004 信学ソ大 (通信), B-1-160, Sept. 2004.
- [39] S. Enomoto, S. Torihata, J. Ichijoh, and R. Osawa, “The measurement result of E-field distribution in a TEM cell using optical E-field sensor,” 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1C1-2, Sendai, pp.117–120, June 2004.
- [40] 呉 奕鋒, 石上 忍, 後藤 薫, 松本 泰, “光電界センサを用いた GTEM セル内の校正領域に関する検討,” 信学技報, EMCJ 2008-06, April 2008.

- [41] 瀧澤和宏, 今津夏香, 長谷川雅弘, 有川 徹, 玉木康博, “MT-RJ 光コネクタ,” フジクラ技報, vol.97, pp.10–15, Oct. 1999.
- [42] NTT News release, 2005/11/8,
<http://www.ntt.co.jp/news/news05/0511/051108a.html>
- [43] H. Togo, S. Mochizuki, N. Kukutsu, and T. Nagatsuma, “Electric-field vector measurement with fiber-mounted electro-optic probe,” 20th Int. Zurich Symposium on EMC, pp.461–464, Zurich, Jan. 2009.
- [44] 若月 温, 村本好史, 石橋忠夫, “UTC-PD を用いたテラヘルツフォトミキサモジュールの開発,” NTT 技術ジャーナル, pp.29–33, Dec. 2011.

(平成 25 年 6 月 11 日受付, 10 月 5 日再受付)



桑原 伸夫 (正員：フェロー)

昭 50 静岡大・工・電子卒, 昭 52 同大大学院修士課程了. 同年日本電信電話公社 (現 NTT) 茨城電気通信研究所入所, 以来, 通信システムの雷防護, 光ケーブルの信頼性評価, 通信システムの EMC 評価, EMC における光計測技術に関する研究・開発に従事. 現在, 九工大・院・教授, 博士 (工学). 電気学会, IEEE 会員.